

12.07.2004

**PRIORITY  
DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



EP 04/6263

REC'D 23 JUL 2004  
WIPO PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:**

103 26 279.2

**Anmeldetag:**

11. Juni 2003

**Anmelder/Inhaber:**

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der  
Wissenschaften e.V., 80539 München/DE;  
Georg-August-Universität Göttingen,  
37073 Göttingen/DE.

**Bezeichnung:**

Plasma-basierte Erzeugung von Röntgenstrahlung  
mit einem schichtförmigen Targetmaterial

**IPC:**

H 05 G, H 05 H

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 21. Juni 2004  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
Der Präsident  
Im Auftrag

H. H. H. H. H.

Plasma-basierte Erzeugung von Röntgenstrahlung  
mit einem schichtförmigen Targetmaterial

5

Die Erfindung betrifft Verfahren zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung mit den Merkmalen des Oberbegriffes von Anspruch 1, Röntgenquellen zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung mit den Merkmalen des Oberbegriffs von Anspruch 22 und Verfahren zur Injektion eines flüssigen Targetmaterials in eine Vakuumkammer.

Es ist bekannt, Röntgenstrahlung mit Röntgenquellen zu erzeugen, bei denen durch hochenergetische Bestrahlung (z. B. Laser-Bestrahlung) ein Targetmaterial in einen Plasmazustand versetzt wird, in dem materialspezifisch Röntgenfluoreszenzstrahlung abgestrahlt wird. Erste Entwicklungen erfolgten mit festen, schichtförmigen Targetmaterialien. Feste Targetmaterialien besitzen jedoch eine relativ hohe Massendichte, so dass bei der Plasmaanregung auch relativ viel Material freigesetzt wird, was für praktische Anwendungen nachteilig ist. Eine Verbesserung wurde durch Verwendung flüssiger, tropfenförmiger Targetmaterialien erzielt. Bspw. wird gemäß EP 186 491 in einer evakuierten Kammer mit einem piezoelektrischen Tropfengeber eine Folge von flüssigen Tropfen erzeugt, die jeweils durch Laserbestrahlung in einen Plasmazustand überführt werden. Aus dem Plasmazustand erfolgt die Emission weicher Röntgenstrahlung, die durch ein Fenster in der Kammer austritt oder mit einer Optik gesammelt wird. Durch die Verwendung flüssiger Targetmaterialien wurde ein Fortschritt erzielt. Diese Röntgenquellen besitzen bislang jedoch eine Reihe von Nachteilen, die je nach Anwendung toleriert oder durch besondere Maßnahmen kompensiert werden.

Die Röntgenquelle gemäß EP 186 401 ist auf die Verwendung von Quecksilber als flüssiges Targetmaterial beschränkt. Entsprechend ist die generierbare Röntgenstrahlung auf bestimmte Spektrallinien eingegrenzt. Ein weiterer Nachteil von Quecksilber ist dessen relativ hoher Dampfdruck, der Probleme beim Auffangen des Quecksilbers und Verunreinigungen in der Kammer verursacht. Flüssige Metalle sind generell unverträglich mit den empfindlichen und extrem kostenintensiven Röntgenoptiken. So können auf Goldoptiken, die z. B. in der Fresnelzonen-Röntgenmikroskopie Standard sind, Schäden durch Quecksilber-amalgam-Verbindungen entstehen. Zur Vermeidung von Verunreinigungen wird in US 5 459 771 vorgeschlagen, als Targetmaterial gefrorene Wasserkristalle zu verwenden. Diese Technik besitzt jedoch den Nachteil eines großen gerätetechnischen Aufwandes bei der Erzeugung der Kristalle und beim Auffangen des Targetmaterials.

Weitere flüssige Targetmaterialien wurden insbesondere für Anwendungen in der Röntgenlithographie vorgeschlagen. Von L. Rymell et al. wird in "Rev. Sci. Instrum." Band 66, 1995, Seite 4916-4920 die Verwendung von Ethanol als flüssiges Targetmaterial beschrieben. Ethanol oder andere monomere Flüssigkeiten besitzen jedoch den Nachteil, dass durch die Plasmaanregung Targetmoleküle in die Gasphase gelangen und sich auf Oberflächen empfindlicher Komponenten ablagern. Die abgelagerten Moleküle werden von der erzeugten Röntgenstrahlung zersetzt, wobei im Fall von Alkoholen teerartige Zersetzungsprodukte entstehen, die sich als unerwünschte Verunreinigungen in der Röntgenquelle und insbesondere auf optischen Bauteilen niederschlagen. Zur Verringerung dieser strahlungsinduzierten Zersetzungen ist eine Abschirmung mit einem Gasstrahl vorgesehen, durch die der Aufbau jedoch nachteilig verkompliziert wird. Neben Ethanol werden gemäß WO 97/40650 Ammoniak, Wasser oder fluorhaltige Flüssigkeiten als Target-

material verwendet. Um einem weiteren generellen Nachteil herkömmlicher flüssiger Targetmaterialien, nämlich der erschwerenden Tropfenbildung in Folge geringer Viskosität, zu begegnen, wird in WO 97/40650 vorgeschlagen, das Targetmaterial in Form eines dünnen Strahls in die Kammer der Röntgenquelle einzuführen. Allerdings wird auch bei dieser Technik monomeres Targetmaterial verwendet, so dass es zu den oben genannten Problemen durch strahlungsinduzierte Zersetzungen von Niederschlägen kommt. Die Verwendung von Wasser als Targetmaterial ist auch aus US 6 377 651 bekannt. In US 6 324 255 wird vorgeschlagen, Stickstoff, Kohlendioxid, Krypton oder Xenon als Targetmaterial zu verwenden.

Von L. Malmqvist et al. wird in "Appl.Phys.Lett." Band 68, 1996, Seite 2627-2629 die Verwendung fluorierter Kohlenwasserstoffverbindungen ( $C_nF_m$ ) vorgeschlagen. Diese sind zwar gut an die Generierung von Fluor-Linien ( $\lambda \approx 1$  bis 2 nm) angepasst, besitzen jedoch auch mehrere Nachteile. Erstens besitzen die sogenannten Perfluor-Kohlenwasserstoffe einen hohen Dampfdruck, der die Bildung eines Flüssigkeitsstrahls und das Auffangen des Targetmaterials nach der Plasmaanregung erschwert. Bspw. beträgt der Dampfdruck von Perfluorpentan bei 0°C schon 0.3 bar. Des Weiteren ist insbesondere bei Anwendungen im Bereich der Röntgenspektroskopie auch die Generierung weiterer, langwelligerer Linien, wie z. B. die Generierung von Kohlenstoff-Emissionen von Interesse. Hierfür werden bisher jedoch Alkohole als Target verwendet (Rymell et al., siehe oben).

Ein genereller Nachteil der herkömmlichen plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung besteht in der geringen Umwandlungseffektivität bei der Bestrahlung des Targetmaterials zur Erzeugung des Plasmazustands. Mit einer zunehmenden Atommasse des Targetmaterials kann die Umwandlungseffektivität

zwar gesteigert werden, gleichzeitig wird es jedoch mit der zunehmenden Atommasse schwieriger, das Targetmaterial im flüssigen Zustand bereitzustellen. Der Wirkungsgrad der Überführung von insbesondere flüssigem Targetmaterial in den Plasmazustand, also das Verhältnis der in dem Plasmazustand angeregten Atome oder Moleküle des Targetmaterials zur eingestrahnten Energie des Laserlichts ist daher verhältnismäßig gering. Beispielsweise wird von B. A. M. Hansson et al. ("Proceedings of SPIE", Bd. 4688, 2002, S. 102 - 109) für die Erzeugung von EUV-Licht ein Wirkungsgrad von nur 0.75 % angegeben.

Bisher hat man sich bemüht, zur Erhöhung des Wirkungsgrades die Fokussierung des eingestrahnten Laserlichts zu verbessern. Die Fokussierung stellt aber unter praktischen Bedingungen ein erhebliches Problem dar, da das Targetmaterial bisher in Form eines Strahls oder in Form von Tropfen mit typischen Durchmessern im Bereich von z. B. 10 µm bis 40 µm bereitgestellt wird. Eine Vergrößerung des Strahldurchmessers, die die Fokussierung erleichtern würde, wäre mit einer stärkeren Belastung des Vakuums in der Vakuumkammer verbunden. Das bisher praktizierte Bemühen um einen möglichst geringen Materialeintrag in die Vakuumkammer, also um einen möglichst geringen Durchmesser des Strahls oder Tropfen, erschwert zusätzlich die Fokussierung des Laserlichts zur Plasmaerzeugung.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, verbesserte Verfahren insbesondere zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung bereitzustellen, mit denen die Nachteile der herkömmlichen Techniken überwunden werden und die sich insbesondere durch einen erhöhten Wirkungsgrad bei der Plasmaerzeugung und damit der Erzeugung von Röntgenstrahlung und eine vereinfachte Fokussierbarkeit der externen Bestrahlung zur Erzeugung des

Plasmazustandes bei gleichbleibendem oder vermindertem Materialeintrag in die Vakuumkammer auszeichnen. Die Aufgabe der Erfindung ist es auch, verbesserte Targetmaterialien zur plasma-basierten Röntgenstrahlerzeugung (insbesondere weiche Röntgenstrahlung oder extreme UV-Strahlung) bereitzustellen, mit denen die Nachteile herkömmlicher Targetmaterialien überwunden werden und die sich zur Umsetzung der erfindungsgemäßen Verfahren eignen. Die Targetmaterialien sollen insbesondere die herkömmlichen Probleme beim Auffangen des Targetmaterials lösen und die Erzeugung von Verunreinigungen vermeiden. Schließlich ist es auch eine Aufgabe der Erfindung, eine verbesserte Röntgenquelle bereitzustellen, die zur Durchführung der verbesserten Verfahren zur plasma-basierten Röntgenstrahlerzeugung geeignet ist.

Diese Aufgaben werden durch Verfahren und Röntgenquellen mit den Merkmalen gemäß den Patentansprüchen 1 und 22 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Verfahrensbezogen basiert die Erfindung auf der allgemeinen technischen Lehre, ein Verfahren zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung, bei dem Targetmaterial in Form eines freien Strömungsgebildes in einer Vakuumkammer zur Erzeugung eines Plasmazustandes hochenergetisch bestrahlt wird, in dem die Röntgenstrahlung abgestrahlt wird, dahingehend weiterzuentwickeln, dass das Strömungsgebilde mit einer Oberfläche geformt wird, die verschiedene Krümmungsradien aufweist, wobei das Targetmaterial wenigstens am Ort der Bestrahlung eine Oberfläche mit einem lokalen Krümmungsminimum (lokales Maximum des Krümmungsradius) besitzt. Das Targetmaterial wird also an einer Stelle bestrahlt, an der das Strömungsgebilde weniger stark gekrümmt ist, als entlang der umgebenden Oberfläche, oder sogar relativ zu anderen Teilen der Oberfläche

entgegengesetzt (negativ) gekrümmt ist. Dies bedeutet, dass die Querschnittsfläche des Strömungsgebildes abweichend von der herkömmlich realisierten kreisrunden Form in eine langgestreckte Form oder ggf. zumindest einseitig konkave Form deformiert wird.

Unter einem freien Strömungsgebilde wird allgemein eine sich strömend mit einer definierten Oberfläche ausbreitende Flüssigkeit, z. B. in Form eines Strahls oder einer auseinander fließenden Flüssigkeitsschicht verstanden. Die Flüssigkeit strömt frei, also mit einer allseits freien Oberfläche und ohne Bindung an einen Träger durch die Vakuumkammer. Das Strömungsgebilde besitzt eine fest stehende Raumform, die somit im Zeitverlauf im wesentlichen unveränderlich ist.

Die Vorteile des erfindungsgemäß geformten Strömungsgebildes ergeben sich aus den folgenden Erkenntnissen der Erfinder. Die Erfinder haben festgestellt, dass sich bei Vergrößerung des Durchmessers eines herkömmlich gebildeten Strahls des Targetmaterials eine erhebliche Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Plasmaerzeugung ergibt. Es wurde festgestellt, dass die Verbesserung nicht allein auf eine größere Substanzmenge im Fokus der externen Bestrahlung, sondern auf den folgenden Effekt zurückzuführen ist. Ein Strahl des Targetmaterials mit einem vergrößerten Durchmesser besitzt eine weniger gekrümmte Oberfläche, was für die Einkopplung der externen Strahlungsenergie günstiger ist. An einer weniger gekrümmten Oberfläche kann ein größerer Anteil der fokussierten Bestrahlung mit einem steileren Einfallswinkel auf das Targetmaterial treffen, so dass Reflektionsverluste vermindert werden.

Eine Vergrößerung des Strahldurchmessers des Targetmaterials ist allerdings wegen des damit verbundenen, vergrößerten Materialeintrags in die Vakuumkammer unerwünscht. Die Erfindung

löst diesen Widerspruch, indem das Strömungsgebilde vollständig oder wenigstens am Ort der Bestrahlung eine nicht-kreiszyklindrische Form besitzt. Damit kann bei gleichbleibendem Materialeintrag der Krümmungsradius der Targetoberfläche  
 5 zumindest lokal maximiert werden. Die Erfinder haben festgestellt, dass im Vakuum überraschenderweise freie Flüssigkeitsgebilde geschaffen werden können, die entgegen dem durch die Oberflächenspannung bedingten Streben, zur Oberflächenminimierung eine Zylinder- oder Kugelform zu bilden, ausreichend stabil sind, um das erwünschte Strömungsgebilde oder  
 10 -muster zu formen.

Die Bestrahlung des Strömungsgebildes an einem lokalen Krümmungsminimum der Oberfläche besitzt eine Reihe von Vorteilen.  
 15 Erstens kann der Einfallswinkel der Bestrahlung optimiert werden. Reflektionsverluste werden vermindert. Der Wirkungsgrad der Plasmaerzeugung kann deutlich gesteigert werden. Des Weiteren kann das Targetmaterial bei gleichbleibendem Materialeintrag eine größere, freie Fläche zur Bestrahlung bieten.  
 20 Dies vereinfacht die Fokussierung von Laserlicht auf das Targetmaterial und ermöglicht eine Vereinfachung des Aufbaus der Röntgenquelle. Andererseits kann durch den erhöhten Wirkungsgrad der Plasmaerzeugung ein Targetmaterial mit relativ hohem Dampfdruck mit kleineren Strahldimensionen eingebracht werden, ohne dass es zu einer starken Minderung der Röntgenintensität kommt.  
 25

Ein weiterer besonderer Vorteil besteht darin, dass im Unterschied zum herkömmlichen zylinder- oder kugelförmigen Targetmaterial, von dem die Röntgenstrahlung mit einer isotropen  
 30 Verteilung ausging, beim erfindungsgemäßen Verfahren eine anisotrope Röntgenemission stattfindet. Dies kann zu einer weiteren Effizienzsteigerung bei der Erzeugung von Röntgenstrahlung ausgenutzt werden. Des weiteren ist die Anisotropie



der emittierten Röntgenstrahlung bezogen auf die Targetoberfläche messbar und durch eine vorbestimmte Drehung der Targetoberfläche auch einstellbar.

- 5 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird das in der Vakuumkammer freistehend geformte Strömungsgebilde mit einer langgestreckten Querschnittsfläche bereitgestellt. Die senkrecht zur Hauptströmungsrichtung des Strömungsgebildes gegebene Querschnittsfläche besitzt in einer Hauptachsenrichtung eine größere Ausdehnung als in einer abweichenden, 10 z. B.  $90^\circ$  auf der Hauptachsenrichtung stehenden Nebenachsenrichtung. Damit ist das lokale Krümmungsminimum auf der mindestens einen Seite des Strömungsgebildes gegeben, die der minimalen Querausdehnung der Querschnittsfläche entspricht.
- 15 Diese Ausführungsform der Erfindung besitzt den besonderen Vorteil, dass das Targetmaterial entsprechend der Nebenachsenrichtung eine besonders große Fläche für die externe Bestrahlung bereitstellt. Die Querschnittsfläche besitzt vorzugsweise eine ovale, z. B. elliptische oder eine abgerundete, 20 rechteckige Form. Diese Varianten können Vorteile in Bezug auf die Bereitstellung des Strömungsgebildes mit einer oder mehreren Düsen und die Handhabung des Targetmaterials in der Vakuumkammer besitzen.
- 25 Besonders vorteilhaft ist es, wenn das Strömungsgebilde wenigstens am Ort der externen Bestrahlung eine frei stehende Flüssigkeitsschicht (liquid sheet) oder Flüssigkeitslamelle bildet. Die Oberfläche der Flüssigkeitsschicht kann lokal eine ebene oder verschwindend gering gekrümmte Oberfläche bilden, 30 in die extern eingestrahltes Laserlicht besonders effektiv einkoppelbar ist.

Wenn die externe Bestrahlung, insbesondere mit Laserlicht auf dem Targetmaterial im Wesentlichen senkrecht auf der Oberflä-

che mit dem lokalen Krümmungsminimum, z. B. auf der Oberfläche der freien Flüssigkeitsschicht erfolgt, können Reflektionsverluste bei der Bestrahlung vorteilhafterweise am besten vermindert und entsprechend der Wirkungsgrad der Plasmaerzeugung erhöht werden.

Die Erfinder haben verschiedene Verfahren entwickelt, mit denen das Strömungsgebilde mit der gewünschten abgeflachten Oberfläche geformt werden kann. Gemäß einer ersten Variante wird das Strömungsgebilde mit einer Targetquelle erzeugt, die eine Düse mit einem nicht-kreisrunden Querschnitt besitzt. Es hat sich überraschenderweise herausgestellt, dass die Strömungsform, die mit einer bspw. abgeflachten Düse dem Strömungsgebilde aufgeprägt wird, in der Vakuumkammer über ausreichend große Strömungslängen erhalten bleibt. Besondere Vorteile für die Erzeugung einer Flüssigkeitsschicht können sich ergeben, wenn eine Düse mit einem schlitzförmigen Querschnitt verwendet wird.

Wenn das Strömungsgebilde gemäß einer Variante der Erfindung wenigstens einseitig oder vorzugsweise beidseitig eine konkave Oberfläche, d. h. eine Oberfläche mit einem negativen Krümmungsradius besitzt, kann die Dicke des Strömungsgebildes insbesondere am Ort der Bestrahlung vorteilhafterweise verringert werden. Damit kann das bei der Bestrahlung in der Vakuumkammer freigesetzte Material vermindert werden.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ermöglicht die Verwendung einer drehbaren Düse mit einem nicht-kreisrunden Querschnitt die Einstellung einer vorbestimmten Ausrichtung der Düse und damit des Targetmaterials relativ zur Richtung der Bestrahlung des Targetmaterials. Die Düse kann um eine Achse entsprechend der Hauptströmungsrichtung des Strömungsgebildes so justiert werden, dass die Bestrah-

lung des Targetmaterials im wesentlichen senkrecht auf der Oberfläche des Strömungsgebildes erfolgt.

- 5 Gemäß einer zweiten Variante ist vorgesehen, dass das Strömungsgebilde mit zwei unter einem Winkel zusammengeführten Primärstrahlen des Targetmaterials erzeugt wird. Am Ort des Zusammentreffens der Primärstrahlen entsteht beim Aufeinanderprallen ein allseitiges Auseinanderströmen, bei dem ein im wesentlichen schichtförmiges Strömungsgebilde erzeugt wird.
- 10 Diese Variante kann Vorteile im Bezug auf die Flexibilität bei der Einstellung des Strömungsgebildes durch Variation von Strömungseigenschaften der beteiligten Primärstrahlen besitzen.
- 15 Die Erzeugung von Prallflächen zwischen zusammenströmenden Flüssigkeiten wird von G. Taylor in „Proceedings of the Royal Society A“, Bd. 259, 1960, S. 1 bis 17 beschrieben. Die früheren Erkenntnisse von G. Taylor wurden jedoch an makroskopischen Systemen (Düsendurchmesser: einige Zentimeter) bei Normaldruck gesammelt. Die Erfinder haben festgestellt, dass die gewünschten Strömungsgebilde überraschenderweise auch bei Unterdruck und mit mikroskopisch kleinen Flüssigkeitsstrahlen (Mikrojets) realisiert werden können.
- 20
- 25 Wenn die Primärstrahlen unter einem Winkel von  $180^\circ$  gegenläufig zusammengeführt werden, kann vorteilhafterweise ein axialsymmetrisches Strömungsgebilde erzeugt werden. Wenn die Primärstrahlen unter einem geringeren Winkel zusammengeführt werden, können sich Vorteile für den Aufbau der Röntgenquelle ergeben. Schnittwinkel der Primärstrahlen werden vorzugsweise
- 30 kleiner als oder gleich  $180^\circ$  (wie z. B.  $120^\circ$ ), insbesondere kleiner als oder gleich  $90^\circ$  gewählt.

Ein weiterer besonderer Vorteil der Erfindung besteht darin, dass die Erzeugung des abgeflachten Strömungsgebildes mit den an sich bekannten Targetmaterialien zur Erzeugung von Röntgenstrahlung, wie z. B. Wasser, Glycerin, Alkohol, verflüssigtes Gas, insbesondere verflüssigtes Edelgas, wie z. B. Xenon oder flüssiges Metall realisierbar ist. Bevorzugt wird jedoch ein Targetmaterial, das aus mindestens einer Kohlenwasserstoffverbindung besteht, die mindestens ein bei Raumtemperatur flüssiges Polymer umfasst. Die Verwendung flüssiger, polymerer Kohlenwasserstoffverbindungen besitzt eine Reihe von Vorteilen in Bezug auf die Bereitstellung des Targetmaterials in einer Röntgenquelle, die Vermeidung von Verunreinigungen und den Aufbau der Röntgenquelle, wie im Folgenden dargestellt wird.

Erstens ist das flüssige, polymere Targetmaterial schwer flüchtig. Schwer flüchtige Substanzen können besonders einfach aus einer Vakuumkammer, in der das Plasma zur Strahlungserzeugung angeregt wird, entfernt werden. Die Substanzen können direkt als Flüssigkeit in einer Falle aufgefangen und dort unter ihrem eigenen Dampfdruck abgeschieden werden. Ein weiteres Vakuumsystem zur Evakuierung der Falle ist nicht zwingend erforderlich, so dass der Aufbau der Röntgenquelle erheblich vereinfacht wird.

Zweitens kann die gewünschte Raumform des Strömungsgebildes mit flüssigen Polymeren mit einer besonders hohen räumlichen Stabilität erzeugt werden. Dies bedeutet, dass die abgeflachte Oberfläche jedes Strömungsgebildes mit einem vergleichsweise großen Abstand von der Düse der Targetquelle, bspw. bis zu 100 mm bereitgestellt werden kann, was die Fokussierung der externen Bestrahlung erheblich erleichtert.

- Drittens werden durch die erfindungsgemäß verwendeten Polymere Erosionsschäden in der Vakuumkammer vermindert. Die Erfinder haben festgestellt, dass Erosionsschäden durch ein Zusammenwirken der Gasatmosphäre, die sich durch den Dampfdruck eines flüssigen Targets immer ausbildet, und der generierten Röntgenstrahlung auftreten können. Durch die Strahlung werden in der Gasatmosphäre vorliegende Targetmoleküle ionisiert. Die Ablagerung der Ionen auf Oberflächen in der Vakuumkammer, z. B. auf Düsen zur Einbringung des Targetmaterials, bewirken eine Plasmaätzung, durch die das jeweilige Material erodiert wird. Das erfindungsgemäß polymere Targetmaterial ist schwer flüchtig, so dass die Teilchenkonzentration in der Gasatmosphäre und mögliche Erosionsschäden minimiert werden.
- 15 Viertens ist der Niederschlag von polymerem Targetmaterial in der Vakuumkammer unkritisch. Aus den Polymeren entstehen bei strahlungsinduzierter Zersetzung leicht flüchtige Produkte, die ohne Weiteres aus der Vakuumkammer abgepumpt werden können. Ein Targetmaterial-Niederschlag kann erfindungsgemäß sogar als Schutzfilm auf Komponenten der Vakuumkammer wirken, der verhindert, dass hochenergetische Polymerfragmente direkt auf die Komponenten gelangen, und ggf. bei einer Reinigung leicht entfernt werden kann.
- 25 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist das flüssige Polymer mindestens eine Etherbindung zwischen Kohlenstoffatomen auf. Durch die Verwendung eines Kohlenwasserstoffs mit mindestens einer Etherbindung (oder Sauerstoffbrücke) werden Vorteile erzielt, die sich ebenfalls auf alle
- 30 Phasen der plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung positiv auswirken. Die Sauerstoff-Brückenverbindungen zwischen Kohlenstoffatomen bewirken eine hohe molekulare Flexibilität. Dies bewirkt eine hohe molekulare Flexibilität (oder: niedrige Viskosität) des polymeren Targetmaterials.

Die niedrige Viskosität wirkt sich vorteilhaft sowohl auf die Erzeugung des abgeflachten Strömungsgebildes als auch auf den Zerfall in niedermolekulare Bestandteile nach der Plasmaanregung aus. Des Weiteren bewirkt die Zusammensetzung des Targetmaterials insbesondere aus Fluor, Kohlenstoff und Sauerstoff einen erweiterten Einsatzbereich des Targetmaterials. Es wird ein universelles Target für verschiedene Anwendungen bereitgestellt.

10 Besonders vorteilhaft ist es, wenn als Targetmaterial ein bei Raumtemperatur (rd. 20°C) flüssiges Polymer verwendet wird, das mindestens einen partiell fluorierten oder perfluorierten, polymeren Kohlenwasserstoffether umfasst. Die teilweise oder vollständige Fluorierung des Polymers fördert die Bildung leicht flüchtiger Zersetzungsprodukte bei Röntgenbestrahlung.

Vorzugsweise wird als Targetmaterial ein Perfluorpolyether (PFPE) oder eine Mischung aus mehreren Perfluorpolyethern verwendet. PFPE-Verbindungen sind hochmolekular, wodurch die Formung des Strömungsgebildes weiter begünstigt wird. Des Weiteren können sie sich durch Aufbrechen von Sauerstoffbrücken bei Energiezufuhr in leicht flüchtige Verbindungen zersetzen, die leicht abgepumpt werden können. Dadurch werden Ablagerungen und Verschmutzungen, insbesondere an optischen Komponenten in der Röntgenquelle vermieden. Mit der Erfindung werden vorteilhafterweise die teuren und empfindlichen Röntgenoptiken geschützt. Nicht zersetzte Reste des Targetmaterials können besonders einfach auch im Vakuum ohne besondere Vorkehrungen zur Kondensation aufgefangen werden.

Gemäß bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung besitzt das polymere Targetmaterial einen Dampfdruck, der bei Raumtemperatur geringer als 10 mbar, vorzugsweise geringer als 1 mbar,

z. B.  $10^{-6}$  mbar, ist, ein Molekulargewicht größer als 100 g/mol, vorzugsweise größer als 300 g/mol, z. B. im Bereich 400 bis 8000 g/mol, und/oder bei Raumtemperatur eine Viskosität, die im Bereich von 1 bis 1800 cS gewählt ist. Die Mas-

5 sendichte des Targetmaterials liegt vorzugsweise im Bereich von 1.5 bis 2.5 g/mol, z. B. 1.8 bis 1.9 g/mol. Durch diese, ggf. in Kombination bereitgestellten Parameter wird die Formung des Targetmaterials und das Auffangen von Materialresten nach der Plasmaanregung verbessert.

10

Die Bestrahlung des Targetmaterials, insbesondere des flüssigen polymeren Targetmaterials erfolgt gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung in einer Umgebung bei einem Druck, der größer als der Gasdruck des bei der Bestrahlung

15 freigesetzten Materials ist. Durch die Erhöhung des Dampfdruckes des Targetmaterials in der Vakuumkammer wird eine lokale Übersättigung bei der Plasmaerzeugung und damit eine Tröpfchenbildung in der Vakuumkammer vermieden. In diesem Fall verbleibt das freigesetzte Gas größtenteils in der Gasphase.

20 Die Abführung aus der Vakuumkammer erfolgt durch Pumpen. Vorteilhafterweise werden somit an die Vakuumbedingungen in der Kammer einer Röntgenquelle verminderte Anforderungen gestellt, so dass das Verfahren mit geringerem gerätetechnischem Aufwand durchgeführt werden kann.

25

Vorrichtungsbezogen wird die oben genannte Aufgabe durch die Bereitstellung einer Röntgenquelle zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung gelöst, die eine Targetquelle zur Bereitstellung des Targetmaterials in Form eines freien

30 Strömungsgebildes in einer Vakuumkammer und eine Bestrahlungseinrichtung zur hochenergetischen Bestrahlung des Targetmaterials aufweist und erfindungsgemäß dahingehend weiterentwickelt ist, dass die Targetquelle dazu eingerichtet ist, dem Targetmaterial eine Strömungsform aufzuprägen, so dass

ein Strömungsgebilde geformt wird, das in mindestens einem Oberflächenbereich ein lokales Krümmungsminimum besitzt.

5 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung besitzt die Targetquelle eine Düse mit einem nicht-kreisrunden Querschnitt, mit der dem Targetmaterial das gewünschte Strömungsmuster aufgeprägt wird. Besonders bevorzugt ist eine Düse mit einer schlitzförmigen Mündung, da mit dieser ein im Wesentlichen schichtförmiges Strömungsgebilde geformt werden kann.

10 Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung besitzt die Düse insbesondere an ihrer Austrittsöffnung eine zumindest einseitig sich nach innen verjüngende Querschnittsfläche. Bei dieser Gestaltung wird vorteilhafterweise  
15 das oben beschriebene konkave Strömungsgebilde geformt. Wenn die Düse in der Vakuumkammer drehbar angeordnet ist, können sich Vorteile für die Ausrichtung des Strömungsgebildes für eine optimale externe Bestrahlung ergeben.

20 Gemäß einer alternativen Ausführungsform der Erfindung ist die Targetquelle mit zwei Düsen ausgestattet, die zur Erzeugung von Primärstrahlen eingerichtet sind, die in der Vakuumkammer unter einem vorbestimmten Winkel aufeinander treffen. Wenn die Düsen mit einem Winkel von  $180^\circ$  aufeinander gerichtet  
25 sind, können sich Vorteile für eine gleichmäßige Formung des Strömungsgebildes ergeben. Wenn die Düsen mit einem Winkel kleiner als oder gleich  $90^\circ$  aufeinander gerichtet sind, können sich Vorteile für den Aufbau der Röntgenquelle und die Flexibilität bei der Formung des Strömungsgebildes ergeben.

30 Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist die Röntgenquelle mindestens eine Heizeinrichtung auf, mit der zumindest Teile der Vakuumkammer temperierbar sind. Die Bereitstellung der mindestens einen Heizeinrichtung ergibt ins-



besondere Vorteile bei der Verwendung des oben genannten polymeren Targetmaterials, da mit der Heizeinrichtung der Dampfdruck des Targetmaterials höher als der Druck des Gases einstellbar ist, das durch die Bestrahlung des Targetmaterials freigesetzt wird. Durch eine Temperaturerhöhung kann der Dampfdruck erhöht werden, was Vorteile für den Aufbau der Vakuumeinrichtung und die Verminderung von Niederschlägen liefert.

10 Wenn die Röntgenquelle mit einer in der Vakuumkammer angeordneten Bestrahlungsoptik zur Bestrahlung des Targetmaterials ausgestattet ist, kann es von Vorteil sein, eine Heizeinrichtung mit der Bestrahlungsoptik zu verbinden, so dass auf dieser Niederschläge des Targetmaterials vermieden werden.

15 Durch die Erhöhung der Effektivität der Bestrahlung und Plasmaerzeugung steigt der Wirkungsgrad der Röntgenquelle. Wenn die Bestrahlungsoptik außerhalb der Vakuumkammer angeordnet ist, kann vorteilhafterweise auf eine gesonderte Heizeinrichtung an der Bestrahlungsoptik verzichtet werden. Es ergibt sich ein vereinfachter Aufbau der Röntgenquelle.

25 Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Röntgenquelle mit einer Sammeleinrichtung zum kühlmittelfreien Auffangen von Targetmaterialresten ausgestattet. Die erfindungsgemäße Röntgenquelle besitzt den Vorteil eines vereinfachten Aufbaus. Durch die Stabilität des Strömungsgebildes des Targetmaterials wird die Justierung einer Bestrahlungseinrichtung zur Anregung des Plasmazustands vereinfacht. Durch den Einsatz einer einfachen Vakuumanlage und die Vermeidung einer aufwendigen Kühleinrichtung ist die Röntgenquelle als mobiles Gerät für einen erweiterten Anwendungsbereich in Laboratorien und in der Industrie geeignet.

Gemäß einer bevorzugten Anwendung der Erfindung wird die Röntgenquelle mit einer Röntgenlithographieeinrichtung, z. B. zur Strukturierung von Halbleiteroberflächen kombiniert.

5 Hierbei kann die Röntgenlithographieeinrichtung in der Vakuumkammer in unmittelbarer Nähe des Ortes der Röntgenstrahlungserzeugung angeordnet werden. Dies ist im Unterschied zu den herkömmlichen Systemen wegen der geringen Tröpfchenbildung und verminderten Niederschläge des erfindungsgemäß verwendeten Targetmaterials erstmalig möglich. Die Röntgenquelle  
10 kann umgekehrt direkt in eine Röntgenlithographieeinrichtung integriert werden. Vorzugsweise ist die Röntgenlithographieeinrichtung mit einer eigenen Heizeinrichtung ausgestattet, so dass ggf. auftretende Rest-Niederschläge leicht in die Gasphase überführt und abgepumpt werden können.

15 Gemäß einer abgewandelten Ausführungsform der Erfindung kann die Vakuumkammer der Röntgenquelle mit einer zusätzlichen Vakuumkammer kombiniert werden, die die Röntgenlithographieeinrichtung enthält. Durch den vereinfachten Aufbau der erfindungsgemäßen Röntgenquelle können beide Vakuumkammern auf engem Raum angeordnet werden.

20 Die erfindungsgemäße Röntgenquelle besitzt den besonderen Vorteil, dass Röntgenstrahlung (oder entsprechend Strahlung im fernen UV-Bereich) bei dauerhaftem Betrieb erzeugt werden kann. Die Anlage kann praktisch ununterbrochen (z. B. über Tage) arbeiten, was besonders wichtig für industrielle Anwendungen der Röntgenquelle ist.

25 30 Weitere Gegenstände der Erfindung, die analog zu den unten beschriebenen Ausführungsformen, allerdings unabhängig von der Erzeugung von Röntgenstrahlung realisiert sein können, sind eine Vakuumkammer mit einer Düse mit einer schlitzförmigen Austrittsöffnung zur Injektion von flüssigem Targetmate-

rial in die Vakuumkammer und Verfahren zur Injektion eines flüssigen Targetmaterials in Form eines freien Strömungsgebildes in eine Vakuumkammer, wobei das Strömungsgebilde so geformt ist, dass das Targetmaterial eine Oberfläche mit einem lokalen Krümmungsminimum besitzt und vorzugsweise eine freie, lamellenförmige Schicht bildet.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden im Folgenden unter Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1: eine schematische Illustration der Bestrahlung eines nicht-zylindrischen Strömungsgebildes,

Fig. 2 und 3: Illustrationen der Strahlformung mit einer schlitzförmigen Düse,

Fig. 4: eine schematische Illustration der Querschnittsfläche eines konkaven Strömungsgebildes,

Fig. 5 und 6: Illustrationen einer schlitzförmigen Düse,

Fig. 7 und 8: Illustrationen zur Erzeugung eines Flächentargets aus zwei Primärstrahlen,

Fig. 9 und 10: Strukturformeln zur Charakterisierung des erfindungsgemäß verwendeten Targetmaterials, und

Fig. 11 bis 14: schematische Darstellungen von Ausführungsformen einer erfindungsgemäßen Röntgenquelle.

In Figur 1 ist die erfindungsgemäße Erzeugung und Bestrahlung eines flüssigen, unter Vakuumbedingungen frei im Raum stehenden Targetmaterials 50 mit einer zumindest einseitig schwach gekrümmten Oberfläche illustriert. Das Targetmaterial 50 wird als Strömungsgebilde geformt, dessen Querschnittsfläche senkrecht zur Strömungsrichtung beispielhaft illustriert ist. Das Targetmaterial 50 wird mit einer Bestrahlungseinrichtung 30 (siehe unten) bestrahlt. Die Bestrahlung ist auf die Oberfläche 52 des Strömungsgebildes 51 gerichtet, an der lokal der Krümmungsradius maximal und die Krümmung minimal ist. Dadurch kann die externe Bestrahlung mit dem gesamten Fokussierquerschnitt im Wesentlichen senkrecht auf der Oberfläche 52 erfolgen.

Beim dargestellten Beispiel besitzt das Strömungsgebilde 51 einen langgestreckten, insbesondere elliptischen Querschnitt. Die y-Richtung bildet eine Hauptachsenrichtung, in der das Strömungsgebilde die Längsausdehnung  $\Delta y$  aufweist. Die x-Richtung mit der geringeren Querausdehnung  $\Delta x$  bildet die Nebenachsenrichtung, in der auch die Bestrahlung erfolgt. Das Targetmaterial 50 besitzt bspw. die folgenden geometrischen Parameter: Längsausdehnung  $\Delta y$ : 100  $\mu\text{m}$  bis 20 mm, Querausdehnung am Ort der Bestrahlung  $\Delta x$ : 2  $\mu\text{m}$  bis 2 mm, senkrechter Abstand der illustrierten Querschnittsfläche von der Düse einer Targetquelle: 0.1 mm bis 10 cm.

Die Figuren 2 und 3 zeigen die Erzeugung nicht-zyklindrischer Flüssigkeitsformen unter Verwendung einer Düse mit einer schlitzförmigen Austrittsöffnung. Figur 2 zeigt das in die Vakuumkammer (siehe unten) ragende Ende der Düse 13 mit der schlitzförmigen Austrittsöffnung 14. Der geometrische Aufbau der Düse als Schlitzdüse ist entsprechend der gewünschten Form des Strömungsgebildes 51 gewählt (siehe auch Figuren 5,

6). Allerdings ist die Austrittsöffnung 14 zur Erzeugung erfindungsgemäßer Mikrojets mit entsprechend kleineren Dimensionen gebildet. Der Schlitz besitzt bspw. eine Breite von 0.1 mm und eine Länge von 3 mm.

5

Von der Düse 13 tritt Targetmaterial durch die schlitzförmige Austrittsöffnung 14 in die Vakuumkammer der Röntgenquelle.

Die Austrittsgeschwindigkeit wird so eingestellt, dass das Targetmaterial in der Vakuumkammer nicht gefriert, und beträgt beispielsweise rd. 20 bis 100 m/s.

10

Nicht-zyklindrische Strahlen können mit zunehmendem Abstand von der Düse 13 eine veränderliche Strahlform besitzen, die von Viskosität, der Oberflächenspannung und der Flusssgeschwindigkeit der austretenden Flüssigkeit abhängig ist. Die nicht-zyklindrische Form der Strömung bleibt zunächst nur über einen endlichen Bereich von wenigen Millimetern erhalten. Unter dem Bestreben, die Oberfläche zu minimieren, bildet sich zunächst eine Einschnürung 53 (Figur 2) mit einem im Wesentlichen kreisförmigen Querschnitt des flüssigen Targetmaterials. Durch die Trägheit der im Strahl bewegten Flüssigkeit erfolgt jedoch anschließend erneut eine Aufweitung 54 des flüssigen Targetmaterials 50.

15

20

25

Der Wechsel von Einschnürungen und Aufweitungen bildet eine oszillierende Struktur, die theoretisch bereits von Rayleigh in „Proceedings of the Royal Society“ Band 29, 1879, S. 71 bis 97 mathematisch beschrieben wurde und in Figur 3 illustriert ist. Abwechselnd sind Einschnürungen 53 und Aufweitungen 54 gebildet, wobei die Orientierung der Aufweitungen 54 abwechselnd senkrecht und parallel zur Zeichenebene verläuft. Vorteilhafterweise kann die Bestrahlung des Targetmaterials am Ort einer Aufweitung 54 nach mehreren Perioden der oszil-

30

- lierenden Struktur erfolgen, wo ein relativ großer Abstand von der Düse 13 gegeben ist. Die Einstellung eines möglichst großen Abstandes des im Targetmaterial erzeugten Plasmas von der Düse besitzt den besonderen Vorteil, dass die Austritts-  
 5 Öffnung der Düse vor einer Erosion durch die freigesetzte Strahlung oder durch geladene Teilchen, die aus dem Plasma hervorgehen, oder durch plasma-induzierte Strahlung geschützt wird.
- 10 Die Form der oszillierenden Struktur, insbesondere die Zahl der realisierten Aufweitungen 54 und deren Abstand von der Düse können insbesondere durch geeignete Wahl der Viskosität des flüssigen Targetmaterials eingestellt werden. Vorteil-  
 15 hafterweise kann somit das Targetmaterial für eine optimale Fokussierung der externen Bestrahlung gewählt werden. Wenn das Targetmaterial eine hochviskose Flüssigkeit ist, so bilden sich die gezeigten Oszillationen nicht. In diesem Fall bleibt das Strömungsgebilde mit elliptischen Querschnitt re-  
 20 lativ weit nach der Austrittsöffnung 14 erhalten und geht ohne Rückschwingung in die zylindrische Form über. In diesem Fall erfolgt die Bestrahlung im Bereich der primären Aufweitung entsprechend der schlitzförmigen Prägung des Strömungsgebildes.
- 25 Figur 4 illustriert in schematischer, vergrößerter Ansicht die Querschnittsfläche eines beidseitig nach innen gewölbten, konkaven Strömungsgebildes 51. Die Oberfläche 52 besitzt ei-  
 30 nen relativ zur Mitte des Strömungsgebildes 51 negativen Krümmungsradius oder Krümmungsradiusverlauf, so dass die Dicke  $\Delta x$  hin zur Mitte vermindert wird. Die Dicke kann vom Rand zur Mitte hin bspw. um bis zu 99 % vermindert werden und im Bereich von 500 nm bis 500  $\mu$ m gewählt sein. Abweichend von der Illustration in Figur 4 kann eine lediglich einseitig konkav gewölbte Form vorgesehen sein.

Die Bestrahlung des Strömungsgebildes 51 erfolgt vorzugsweise senkrecht auf die Oberfläche 52 am Ort der minimalen Querausdehnung  $\Delta x$ . In Abhängigkeit vom Material oder der Geometrie der Bestrahlung kann es vorteilhaft sein, alternativ die Oberfläche 52 außerhalb des Ortes der geringsten Querausdehnung zu bestrahlen.

Die Querschnittsform des Strömungsgebildes wird insbesondere durch die Gestaltung der Düse der Targetquelle bestimmt. Überraschenderweise hat sich herausgestellt, dass insbesondere die konkave oder hantelförmige Strömungsform gemäß Figur 4 dem Strömungsgebilde durch eine geeignete Düsenform aufgeprägt werden kann und beim Austritt in einen Raum mit Unterdruck (insbesondere Vakuum) über einen ausreichend großen Abstand stabil bleibt.

Grundsätzlich kann die Düse 13 durch eine schlitzförmige Öffnung 14 am Ende einer Leitung für das Targetmaterial gebildet werden (Fig. 2). Besondere Vorteile für einen stabilen, nicht-zylindrischen Strahl ergeben sich bei der Verwendung eines Düsenaufbaus, der in den Figuren 5 und 6 illustriert ist. Figur 5 zeigt die Mündung oder Austrittsöffnung einer Düse 13 in Strömungsrichtung (von innen, linkes Teilbild) und entgegen der Strömungsrichtung (von außen, rechtes Teilbild). Auf der Innenseite ist ein Düsenschlitz 14a vorgesehen, der sich über die gesamte Breite der Austrittsöffnung 14 erstreckt und dessen Schlitzbreite sich in Strömungsrichtung vermindert (siehe rechtes Teilbild in Fig. 6). In Strömungsrichtung an den Düsenschlitz 14a anschließend ist eine kegelförmige Mündung 14b vorgesehen, durch die das Targetmaterial 50 in die Vakuumkammer austritt (s. Fig. 6). Das strömende Targetmaterial wird zunächst durch den Düsenschlitz 14a gepresst, wobei es zusammenläuft. Anschließend läuft das Tar-

getmaterial an den Rändern der Kegelöffnung 14b auseinander, so dass sich die gewünschte Lamellenform des Strömungsgebildes ergibt. Durch die Kegelöffnung 14b wird die erste Oszillation des Strömungsgebildes (s. Fig. 3) beeinflusst.

5

Ein besonderer Vorteil der Düse 13 gemäß Fig. 5 besteht darin, dass die konkave Form des Strömungsgebildes gemäß Fig. 4 durch das Zusammenwirken des Düsenschlitzes 14a und der Kegelöffnung 14b gebildet wird. Die Dicke des Strömungsgebildes 51 nimmt zu den Rändern hin zu (s. gestrichelte Linie in Fig. 6).

10

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Düse zur Erzeugung des abgeflachten Strömungsgebildes drehbar angeordnet. Die Drehbarkeit bezieht sich auf die Achse der Austrittsrichtung oder Injektions- oder Strömungsrichtung des Targetmaterials durch die Düse. Die Drehbarkeit kann bspw. durch die Verwendung einer Drehhalterung der Düse und einer drehbaren Flüssigkeitsleitung der Targetquelle realisiert werden. Alternativ kann eine starre Flüssigkeitsleitung über eine Drehkupplung mit der Düse verbunden sein. Zur Einstellung einer bestimmten Ausrichtung der Düse insbesondere relativ zu Bestrahlungsrichtung ist die Düse mit einer Stelleinrichtung ausgestattet, die bspw. einen Schrittmotor oder einen piezoelektrischen Antrieb umfasst.

20

25

Die Figuren 7 und 8 illustrieren die Formung des Strömungsgebildes 51 an der Prallfläche zwischen zwei Primärstrahlen 55, 56 des Targetmaterials, die mit zwei getrennten Düsen 15, 16 in der Vakuumkammer aufeinander gerichtet werden. Die Figuren 7A bis 7C basieren zeichnerisch auf Darstellungen aus der genannten Publikation von G. Taylor. Erfindungsgemäß werden gemäß den Figuren 7A und 8A zwei Primärstrahlen mit einem Durchmesser von z. B. 30  $\mu\text{m}$  unter einem Winkel von z. B.

30



60 ° zusammengeführt, so dass sich das Strömungsgebilde 51 mit einer Dicke von weniger als 30 µm (z. B. 3 µm) und einer Ausdehnung von z. B. 1 bis 2 mm formt. Wenn gemäß Figur 7B das Zusammentreffen der Primärstrahlen 55, 56 unter einem vergrößerten Schnittwinkel von z. B. 90 ° erfolgt, wird das Strömungsgebilde 51 auch oberhalb der Prallfläche geformt, es ergibt sich eine größere Ausdehnung der Schicht des Strömungsgebildes 51. Wenn die Düsen 15, 16 gemäß Figur 8B oder 8C entgegengesetzt um 180° ausgerichtet sind, ergibt sich ein Strömungsgebilde 51 gemäß Figur 7C, welches seitlich horizontal (Figur 8B) oder über einen Umlenkspiegel vertikal (Figur 8C) bestrahlt werden kann.

Allgemein wird der Ort der Zusammenführung der Primärstrahlen so gewählt, dass die Primärstrahlen noch nicht in Tropfen zerfallen sind (Abstand von den Düsen geringer als der Tropfenzerfallsabstand). Die Düsen 15, 16 können kreisrunde oder schlitzförmige, insbesondere elliptische oder rechteckige Querschnittsflächen besitzen.

Die Zusammenführung von zwei Jets (Primärstrahlen) besitzt den Vorteil, dass die Formung des flachen Strömungsgebildes im Raum variabel ist. Auch in diesem Fall kann das Strömungsgebilde mit einem vergrößerten Abstand von der Düse 13 bereitgestellt werden.

Das erfindungsgemäß in einer Plasma-Röntgenquelle bevorzugt verwendete Targetmaterial basiert auf einer bei Raumtemperatur flüssigen, polymeren Kohlenwasserstoffverbindung, insbesondere mit mindestens einer Etherbindung. Ein Baustein einer derartigen Kohlenwasserstoffverbindung ist beispielhaft in Figur 9 illustriert. Es wird betont, dass die Umsetzung der Erfindung nicht auf die illustrierten Beispiele beschränkt ist. Alternativ zu fluorierten Polyethern können erfindungs-

gemäß allgemein auch nicht-fluorierte Polymere, Gemische aus fluorierten und nicht-fluorierten Polymeren oder Polymere mit einem geringen Lösungsmittel-Anteil (kleiner als 20 Vol.-%) verwendet werden. Ferner kann die Fluorierung zumindest teilweise durch eine andere Halogenierung, insbesondere eine Chlorierung ersetzt werden.

Das in Figur 9 beispielhaft gezeigte Targetmaterial besteht aus einer Vielzahl derartig oder entsprechend aus C, F, O und ggf. H aufgebauten Bausteinen, so dass ein schwerflüchtiges Polymer gebildet wird. Die Verwendung des schwerflüchtigen Polymers vermindert vorteilhafterweise die Anforderungen an das Vakuumsystem einer Röntgenquelle.

Das Targetmaterial bildet insbesondere einen partiell oder perfluorierten Polyether (PFPE) oder eine Mischung aus mehreren partiell fluorierten oder perfluorierten Polyethern. Ein Perfluorpolyether ist beispielhaft in Figur 10 illustriert. Zu dieser Substanzklasse gehören auch die PFPE-Verbindungen FOMBLIN (registrierte Marke) und GALDEN (registrierte Marke).

In Figur 11 ist ein Beispiel einer erfindungsgemäßen Röntgenquelle schematisch illustriert. Die Röntgenquelle umfasst eine Targetquelle 10, die mit einer temperierbaren Vakuumkammer 20 verbunden ist, eine Bestrahlungseinrichtung 30 und eine Sammeleinrichtung 40. Die Targetquelle 10 umfasst ein Reservoir 11 für das Targetmaterial, eine Zufuhrleitung 12 und eine Düse 13. Mit einer (nicht dargestellten) Betätigungseinrichtung, die bspw. eine Pumpe oder eine piezoelektrische Fördereinrichtung umfasst, wird Targetmaterial zur Düse 13 geführt und von dieser in Form eines Flüssigkeitsstrahls 50 abgegeben und in die Vakuumkammer 20 injiziert.

Der Flüssigkeitsstrahl 50 wird beispielsweise wie dargestellt vertikal in die Vakuumkammer 20 injiziert. Alternativ kann zur Umsetzung der Erfindung eine andere Strahlrichtung, wie zum Beispiel eine horizontale Injektion oder eine Injektion unter einem anderen Winkel relativ zur Horizontalen vorgesehen sein.

Die Bestrahlungseinrichtung 30 umfasst eine Strahlungsquelle 31 und eine Bestrahlungsoptik 32, mit der Strahlung von der Strahlungsquelle 31 auf das Targetmaterial 50 fokussierbar sind. Die Strahlungsquelle 31 ist bspw. ein Laser, dessen Licht ggf. mit Hilfe von Umlenkspiegeln (nicht dargestellt) hin zum Targetmaterial gelenkt wird. Alternativ kann als Bestrahlungseinrichtung eine Ionenquelle oder eine Elektronenquelle vorgesehen sein, die mit in der Kammer 20 angeordnet ist.

Die Sammeleinrichtung 40 umfasst einen Aufnehmer 41 z. B. in Form eines Trichters oder einer Kapillare, der Targetmaterial, das nicht unter Einwirkung der Bestrahlung verdampft ist, aus der Vakuumkammer entfernt und in einen Sammelbehälter 42 leitet. Wegen der Verwendung des flüssigen Polymers als Targetmaterial kann die gesammelte Flüssigkeit vorteilhafterweise ohne weitere Maßnahmen im Sammelbehälter 42 aufgefangen werden. Um ggf. die Gefahr eines Rückstroms von gesammeltem Targetmaterial in die Vakuumkammer 20 zu vermeiden, kann eine Kühlung des Sammelbehälters 42 mit einer Kühleinrichtung (nicht dargestellt) und/oder eine Vakuumpumpe (nicht dargestellt) vorgesehen sein.

Die Vakuumkammer 20 umfasst ein Gehäuse 21 mit mindestens einem ersten Fenster 22, durch das das Targetmaterial 50 bestrahlbar ist, und mindestens einem zweiten Fenster 23, durch das die generierte Röntgenstrahlung austritt. Das zwei-

te Fenster 23 ist optional vorgesehen, um die generierte Röntgenstrahlung aus der Vakuumkammer 20 für eine bestimmte Anwendung auszukoppeln. Falls dies nicht erforderlich ist, kann auf das zweite Fenster 23 verzichtet werden (siehe unten). Die Vakuumkammer 20 ist ferner mit einer Vakuumeinrichtung 24 verbunden, mit der in der Kammer 20 ein Unterdruck erzeugt wird. Dieser Unterdruck liegt vorzugsweise unterhalb von  $10^{-4}$  mbar. Die Bestrahlungsoptik 32 ist ebenfalls in der Vakuumkammer 20 angeordnet.

10

Die Vakuumkammer 20 ist mit einer Heizeinrichtung 60 ausgestattet, die einen oder mehrere Thermostaten 61 bis 63 umfasst. Mit den Thermostaten sind das Gehäuse 21, der Aufnehmer 41 und/oder die Bestrahlungsoptik 32 temperierbar. Ggf. kann auch die Targetquelle 10 temperiert werden. Ein Thermostat umfasst beispielsweise eine an sich bekannte Widerstandsheizung.

15

Die mit der Heizeinrichtung 60 eingestellte Temperatur wird so gewählt, dass der Dampfdruck des insbesondere von polymerem Targetmaterial den Gasdruck übersteigt, der durch Bestrahlung des Targetmaterials 50 mit der Bestrahlungseinrichtung 30 gebildet wird. Dadurch wird erfindungsgemäß eine Übersättigung der Gasphase in der Vakuumkammer vermieden. Das freigesetzte Polymer bleibt gasförmig und kann nahezu quantitativ mit der Vakuumeinrichtung 24 abgepumpt werden.

20

25

Das zweite Fenster 23 besteht aus einem für weiche Röntgenstrahlung transparenten Fenstermaterial, z. B. aus Beryllium. Wenn das zweite Fenster 23 vorgesehen ist, kann sich eine evakuierbare Bearbeitungskammer 26 anschließen, die mit einer weiteren Vakuumeinrichtung 27 verbunden ist. In der Bearbeitungskammer 26 kann die Röntgenstrahlung zur Materialbearbeitung auf ein Objekt abgebildet werden. Es ist bspw. eine

30

Röntgenlithographieeinrichtung 70 vorgesehen, mit der die Oberfläche eines Halbleitersubstrats bestrahlt wird. Die räumliche Trennung der Röntgenquelle in der Vakuumkammer 20 und der Röntgenlithographieeinrichtung 70 in der Bearbeitungskammer 26 besitzt den Vorteil, dass das zu bearbeitende Material nicht Ablagerungen von verdampftem Targetmaterial ausgesetzt wird.

Die Röntgenlithographieeinrichtung 70 umfasst bspw. einen Filter 71 zur Selektion der gewünschten Röntgen-Wellenlänge, eine Maske 72 und das zu bestrahlende Substrat 73. Zusätzlich können Abbildungsoptiken (bspw. Spiegel) vorgesehen sein, um die Röntgenstrahlung auf die Einrichtung 70 zu lenken.

Bei der abgewandelten Ausführungsform der Erfindung gemäß Figur 12 ist die Röntgenlithographieeinrichtung 70 in der Vakuumkammer 20 angeordnet. Zur Vermeidung von Niederschlägen ist die Einrichtung 70 ebenfalls mit einem Thermostaten 64 verbunden. Des Weiteren illustriert Figur 12 die Verwendung von einer Doppeldüse 15, 16 (siehe Figur 8) zur Erzeugung von Strömungsgebilden gemäß Figur 7.

Wenn die Bestrahlungsoptik 32 gemäß Figur 13 außerhalb der Vakuumkammer 20 angeordnet wird, kann vorteilhafterweise auf eine gesonderte Temperierung verzichtet werden. In diesem Fall muss allerdings das Fenster 22 ausreichend stabil in Bezug auf die zumindest teilweise fokussierte und ggf. hochrepetierende Strahlung der Strahlungsquelle 31 sein. Des Weiteren wird bei dieser Ausführungsform das Targetmaterial 50 relativ dicht (z. B. im Abstand von wenigen cm) am Fenster 22 vorbeigeführt. Auch bei dieser Ausführungsform kann eine Doppeldüse anstelle der illustrierten Düse 13 verwendet werden.

Wenn flüssige Polymere als Targetmaterial verwendet werden, deren Dampfdruck so hoch ist, dass eine Temperierung des Gehäuses 21 nicht erforderlich ist, so sollten dennoch empfindliche Komponenten der Vakuumkammer 20, wie z. B. die Abbildungsoptik 32 oder die Einrichtung 70 geheizt werden. Diese Ausführungsform der Erfindung ist in Figur 14 illustriert. Durch die lokale Heizung wird vorteilhafterweise erreicht, dass das bei der Bestrahlung freigesetzte Targetmaterial bevorzugt auf den kälteren Wänden des Gehäuses 21 abgesetzt wird. Die empfindlichen, für die jeweilige Anwendung wichtigen Komponenten werden geschont.

Zur erfindungsgemäßen Generation von Röntgenstrahlung werden mit der Targetquelle 10 ein Strahl oder Tropfen des Targetmaterials 50 in Gestalt des erfindungsgemäßen Strömungsgebildes erzeugt. Das Strömungsgebilde 50 wird mit der Bestrahlungseinrichtung 30 in an sich bekannter Weise bestrahlt. Die Bestrahlung erfolgt fokussiert mit einer derartigen Intensität, dass das Targetmaterial in einen Plasmazustand überführt wird. Es ist bspw. eine Energiezufuhr von 100 mJ pro Bestrahlungspuls (z. B. pro Laserschuss) vorgesehen. Bei einer Pulsrate von 10 kHz wird dabei eine Ausgangsleistung von bis zu 50 W erreicht. Im Plasmazustand wird weiche Röntgenstrahlung emittiert und zur ggf. jeweiligen Anwendung durch das zweite Fenster 23 ausgekoppelt.

Die Röntgenstrahlung umfasst einen Wellenlängenbereich von bis zu ungefähr 15 nm. Vorteilhafterweise werden insbesondere die  $K\alpha$ -Linie mit  $\lambda = 3.37$  nm, F-Linien mit  $\lambda = 0.7$  nm bis 1.7 nm und 12.6 nm und die O-Linie mit  $\lambda = 13$  nm emittiert. Besonders vorteilhaft ist, dass bei der Verwendung von Perfluoropolyether die Kohlenstoff- $K\alpha$ -Linie unter Vermeidung störender Graphitablagerungen generiert werden kann. In der Röntgenmikroskopie ist die  $K\alpha$ -Linie von starkem Interesse,

da diese in das sogenannte "Wasserfenster" fällt, in dem keine Röntgenabsorption durch Wasser auftritt. Durch die dauerhafte Vermeidung von Erosionen und Ablagerungen ist die erfindungsgemäße Röntgenquelle für röntgenmikroskopische und litho-graphische Anwendungen hervorragend geeignet. Ein weiterer Vorteil ist durch die Miniaturisierung des Aufbaus gegeben. Die Einrichtung 70 (siehe Figur 12) kann in unmittelbarer Nähe des Fokus der Bestrahlungseinrichtung 30 angeordnet werden.

10

Wegen der geringen Flüchtigkeit des erfindungsgemäß verwendeten Materials kann die Sammeleinrichtung 40 vorteilhafterweise ohne ein Kühlmittel und ohne eine Kühleinrichtung betrieben werden. Es ist insbesondere nicht erforderlich, dass eine sogenannte Kryofalle oder ein Abscheider zum Kondensieren von Restmaterialien vorgesehen ist. Der Aufnehmer 41 und der Sammelbehälter 42 sind direkt miteinander verbunden.

15

Die nicht von der Sammeleinrichtung 40 erfassten Restmaterialien sind vorteilhafterweise leicht flüchtige Komponenten, die mit der Vakuumeinrichtung 24 aus der Kammer 20 entfernt werden können. Die Vakuumeinrichtungen 24, 27 umfassen bspw. Drehschieber-Ölpumpen.

20

Bevorzugte Anwendungen der erfindungsgemäßen Röntgenquelle bestehen in der analytischen Chemie, in der Röntgenmikroskopie, in der Röntgenlithographie und in der Kombination mit weiteren spektroskopischen Messverfahren, wie z. B. der fs-Spektroskopie.

25

30

Weitere Anwendungen der Erfindung bestehen überall, wo ein Interesse an der Untersuchung oder der Verwendung freier Flüssigkeiten unter Vakuumbedingungen von Interesse ist. Beispielsweise können flüssige Proben für photoelektronen- oder

photoabsorptionsspektroskopische Untersuchungen oder entsprechende Streuexperimente entsprechend der erfindungsgemäßen Technik in die jeweilige Untersuchungskammer eingebracht werden. Es kann eine hochenergetische Bestrahlung oder ein Teilchenbeschuss vorgesehen sein.

Eine alternative Anwendung erfindungsgemäßer, schichtförmiger Targetmaterialien ist bei ggf. zeitaufgelösten Röntgenabsorptionsexperimenten mit Synchrotronstrahlung gegeben (s. K. R. Wilson et al. in „J. Phys. Chem. B“, Bd. 105, 2001, S. 3346-3349). Auch bei diesen Anwendungen ist die vergrößerte Längsausdehnung der Schichtströmung von Vorteil, da sich das Fokussieren der Strahlung auf das Target erleichtert.

Schließlich kann die erfindungsgemäß gebildete Flüssigkeitsschicht als Quelle für Tröpfen oder Makrocluster (Spray) verwendet werden. Nach einem endlichen Abstand von der Düse zerfällt das Strömungsgebilde in einzelne Tröpfchen, die zur Erzeugung von Röntgenstrahlung bestrahlt werden.

Die in der vorstehenden Beschreibung, den Zeichnungen und den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausgestaltungen von Bedeutung sein.



# PATENTANSPRÜCHE

- 5 1. Verfahren zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung, mit den Schritten:
- Bereitstellung eines Targetmaterials (50) in Form eines freien Strömungsgebildes (51) in einer Vakuumkammer (20), und
  - Bestrahlung des Targetmaterials (50), um einen Plasma-
  - 10 zustand zu erzeugen, in dem die Röntgenstrahlung abgestrahlt wird,
- dadurch gekennzeichnet, dass
- das Strömungsgebilde (51) so geformt wird, dass das Target-
  - material wenigstens am Ort der Bestrahlung eine Oberfläche
  - 15 (52) mit einem lokalen Krümmungsminimum besitzt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Strömungsgebilde (51) wenigstens am Ort der Bestrahlung eine Querschnittsfläche besitzt, die in einer Hauptachsenrichtung (y) eine Längsausdehnung  $\Delta y$  aufweist, die größer ist als eine Querausdehnung  $\Delta x$  in einer von der Hauptachsenrichtung (y) abweichenden Nebenachsenrichtung (x).
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem das Strömungsgebilde (51) wenigstens am Ort der Bestrahlung eine ovale Querschnittsfläche oder eine abgerundete, rechteckige Querschnittsfläche besitzt.
- 25 4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, bei dem das Strömungsgebilde (51) wenigstens am Ort der Bestrahlung eine freie, lammellenförmige Schicht bildet.
- 30

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, bei dem das Strömungsgebilde (51) wenigstens am Ort der Bestrahlung wenigstens einseitig eine konkave Oberfläche besitzt.
- 5 6. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Strömungsgebilde (51) des Targetmaterials mit einer Targetquelle erzeugt wird, die eine Düse mit einer nicht-kreisrunden Austrittsöffnung (14) besitzt.
- 10 7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem das Strömungsgebilde (51) des Targetmaterials mit einem Dispenser erzeugt wird, der eine Düse mit einer schlitzförmigen Austrittsöffnung (14) besitzt.
- 15 8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, bei dem die Düse zur Einstellung einer vorbestimmten Ausrichtung relativ zur Richtung der Bestrahlung des Targetmaterials (50) gedreht wird.
- 20 9. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 4, bei dem das Strömungsgebilde (51) des Targetmaterials mit zwei Primärstrahlen erzeugt wird, die zur Bildung einer frei stehenden Flüssigkeitsschicht unter einem vorbestimmten Winkel zusammengeführt werden.
- 25 10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem die Primärstrahlen unter einem Winkel zusammengeführt werden, der kleiner oder gleich  $180^\circ$  ist.
- 30 11. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem die Primärstrahlen unter einem Winkel zusammengeführt werden, der kleiner oder gleich  $90^\circ$  ist.

12. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Strömungsgebilde (51) des Targetmaterials auf der Oberfläche (52) mit dem lokalen Krümmungsminimum im wesentlichen senkrecht bestrahlt wird.

5

13. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Targetmaterial eines der folgenden Materialien verwendet wird: mindestens eine Kohlenwasserstoffverbindung, die mindestens ein bei Raumtemperatur flüssiges Polymer umfasst, Wasser, Glycerin, Alkohol, verflüssigtes Gas, oder flüssiges Metall.

10

14. Verfahren nach Anspruch 13, bei dem die als Targetmaterial verwendete Kohlenwasserstoffverbindung mindestens eine Etherbindung zwischen Kohlenstoffatomen aufweist.

15

15. Verfahren nach Anspruch 14, bei dem die als Targetmaterial verwendete Kohlenwasserstoffverbindung mindestens einen partiell fluorierten oder perfluorierten, polymeren Kohlenwasserstoffether aufweist.

20

16. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem die als Targetmaterial verwendete Kohlenwasserstoffverbindung einen Perfluorpolyether oder eine Mischung aus Perfluorpolyethern aufweist.

25

17. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 13 bis 16, bei dem die als Targetmaterial verwendete Kohlenwasserstoffverbindung einen Dampfdruck bei Raumtemperatur geringer als 10 mbar, ein Molekulargewicht größer als 100 g/mol und/oder eine Viskosität im Bereich von 1 cS bis 1800 cS besitzt.

30

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 13 bis 17, bei dem die Bestrahlung des Targetmaterials (50) in einer Vakuumkammer (20) erfolgt, die zumindest lokal derart geheizt

ist, dass der Dampfdruck des Targetmaterials (50) höher als der Druck des Gases ist, das durch die Bestrahlung des Targetmaterials (50) freigesetzt wird.

- 5 19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 13 bis 18, bei dem Targetmaterial (50) nach der Bestrahlung in einer Sammeleinrichtung (40) bei Raumtemperatur aufgefangen wird.
- 10 20. Verwendung von bei Raumtemperatur flüssigen, polymeren Kohlenwasserstoffverbindungen zur Bereitstellung von Targetmaterial in Form eines Strömungsgebildes (51), wobei das Targetmaterial wenigstens am Ort einer Bestrahlung zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlung eine Oberfläche mit einem lokalen Krümmungsminimum besitzt.
- 15 21. Verwendung von partiell fluorierten oder perfluorierten, polymeren Kohlenwasserstoffethern zur Bereitstellung von Targetmaterial in Form eines freien Strömungsgebildes (51), wobei das Targetmaterial wenigstens am Ort einer Bestrahlung zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlung eine Oberfläche mit einem lokalen Krümmungsminimum besitzt.
- 20 22. Röntgenquelle zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung durch hochenergetische Bestrahlung eines Targetmaterials (50) in Form eines freien Strömungsgebildes (51), die umfasst:
  - eine Targetquelle (10), die in einer Vakuumkammer (20) das Targetmaterial (50) bereitstellt, und
  - eine Bestrahlungseinrichtung (30) zur Bestrahlung des Targetmaterials (50) in der Vakuumkammer,
- 30 **dadurch gekennzeichnet, dass**
  - die Targetquelle dazu eingerichtet ist, das Targetmaterial so zu formen, dass das Targetmaterial im Strömungsgebilde

(51) wenigstens am Ort der Bestrahlung eine Oberfläche mit einem lokalen Krümmungsminimum besitzt.

23. Röntgenquelle nach Anspruch 22, bei der die Targetquelle eine Düse (13) mit einer nicht-kreisrunden Austrittsöffnung (14) besitzt.

24. Röntgenquelle nach Anspruch 23, bei der die Targetquelle eine Düse (13) mit einer schlitzförmigen Austrittsöffnung (14) besitzt.

25. Röntgenquelle nach Anspruch 24, bei der die Targetquelle eine Düse (13) mit einer elliptischen, rechteckigen oder konvex sich nach innen verjüngenden Austrittsöffnung (14) besitzt.

26. Röntgenquelle nach Anspruch 24, bei der die Düse (13) eine Austrittsöffnung (14) mit einem Düsenschlitz (14a) und einer Kegelöffnung (14b) besitzt.

26. Röntgenquelle nach mindestens einem der Ansprüche 23 bis 25, bei der die Düse (13) in der Vakuumkammer (20) drehbar angeordnet ist.

28. Röntgenquelle nach Anspruch 22, bei der die Targetquelle zwei Düsen (15, 16) zur Erzeugung von Primärstrahlen aufweist, die zur Bildung einer frei stehenden Flüssigkeitsschicht (51) unter einem vorbestimmten Winkel zusammengeführt werden.

29. Röntgenquelle nach Anspruch 28, bei der die Düsen (15, 16) so ausgerichtet sind, dass die Primärstrahlen unter einem Winkel von  $180^\circ$  zusammengeführt werden.

30. Röntgenquelle nach Anspruch 28, bei der die Düsen (15, 16) so ausgerichtet sind, dass die Primärstrahlen unter einem Winkel zusammengeführt werden, der kleiner als oder gleich  $90^\circ$  ist.

5

31. Röntgenquelle nach mindestens einem der Ansprüche 22 bis 30, bei der mindestens eine Heizeinrichtung (60) vorgesehen ist, mit der zumindest Teile der Vakuumkammer (20) temperierbar sind.

10

32. Röntgenquelle nach Anspruch 31, bei der die Heizeinrichtung (60) mehrere Thermostaten (61-64) umfasst, die mit Komponenten an und/oder in der Vakuumkammer (20) verbunden sind.

15 33. Röntgenquelle nach Anspruch 32, bei der die Bestrahlungseinrichtung eine Bestrahlungsoptik aufweist, die in der Vakuumkammer (20) angeordnet und mit einem Thermostaten (63) verbunden ist.

20 34. Röntgenquelle nach mindestens einem der Ansprüche 22 bis 32, bei der die Bestrahlungseinrichtung eine Bestrahlungsoptik aufweist, die außerhalb der Vakuumkammer (20) angeordnet ist.

25 35. Röntgenquelle nach mindestens einem der Ansprüche 22 bis 34, bei der eine Sammeleinrichtung (40) zum Auffangen des Targetmaterials (50) nach der Bestrahlung vorgesehen ist, die zum kühlmittelfreien Betrieb eingerichtet ist.

30 36. Röntgenquelle nach mindestens einem der Ansprüche 22 bis 35, bei der in der Vakuumkammer (20) eine Röntgenlithographieeinrichtung (70) angeordnet ist.

37. Röntgenquelle nach Anspruch 36, bei der die Röntgenlithographieeinrichtung (70) mit einem Thermostaten (64) verbunden ist.

5 38. Röntgenquelle nach mindestens einem der Ansprüche 22 bis 37, bei der die Vakuumkammer (20) mit einer Bearbeitungskammer (26) verbunden ist, in der eine Röntgenlithographieeinrichtung (70) angeordnet ist.

10 39. Vakuumkammer mit einer Düse (13) mit einer schlitzförmigen Austrittsöffnung (14) zur Injektion von flüssigem Targetmaterial in die Vakuumkammer.

15 40. Vakuumkammer nach Anspruch 39, bei der die Düse (13) drehbar um eine Achse, die parallel zur Richtung der Injektion des flüssigen Targetmaterials verläuft, angeordnet ist.

20 41. Verfahren zur Injektion eines flüssigen Targetmaterials (50) in Form eines freien Strömungsgebildes (51) in eine Vakuumkammer (20)

**dadurch gekennzeichnet, dass**

das Strömungsgebilde (51) so geformt ist, dass das Targetmaterial eine Oberfläche (52) mit einem lokalen Krümmungsminimum besitzt.

25

42. Verfahren nach Anspruch 41, bei dem das Strömungsgebilde (51) eine freie, lamellenförmige Schicht bildet.

30 43. Verfahren nach Anspruch 41 oder 42, bei dem das Strömungsgebilde (51) mindestens einseitig eine konkave Oberfläche (52) besitzt.

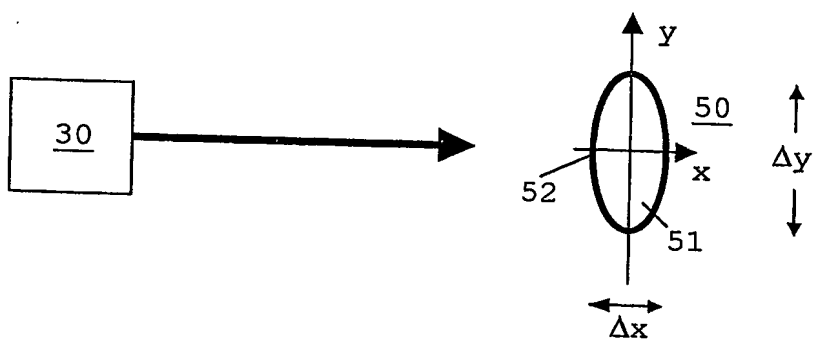
16075 Hz

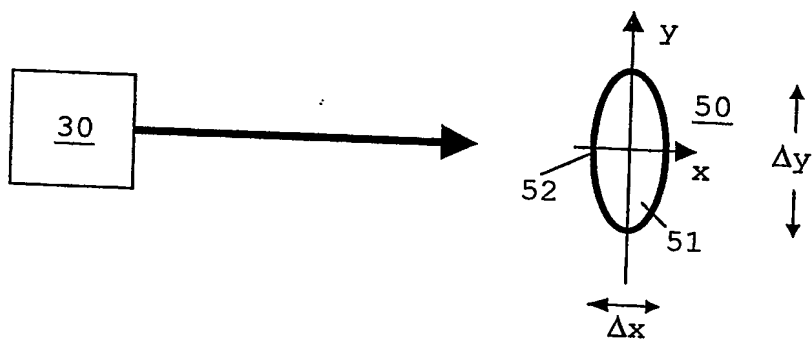
### **Zusammenfassung**

5 Es werden Verfahren zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung mit den Schritten Bereitstellung eines Targetmaterials (50) in Form eines freien Strömungsgebildes (51) in einer Vakuumkammer (20), und Bestrahlung des Targetmaterials (50), um einen Plasmazustand zu erzeugen, in dem die Röntgenstrahlung abgestrahlt wird, beschrieben, wobei das Strömungsgebilde (51) so geformt wird, dass das Targetmaterial wenigstens am Ort der Bestrahlung eine Oberfläche (52) mit einem lokalen Krümmungsminimum besitzt. Es werden auch Vorrichtungen zur Umsetzung der Verfahren und insbesondere Röntgenquellen zur plasma-basierten Erzeugung von Röntgenstrahlung beschrieben.

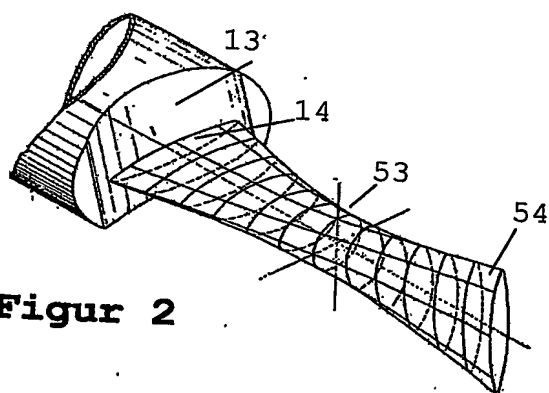
(Fig. 1)



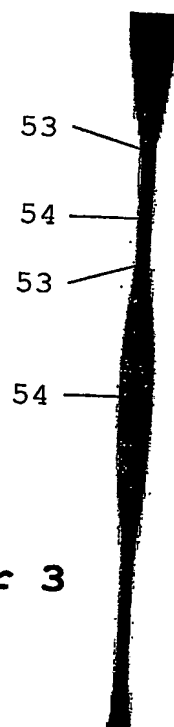




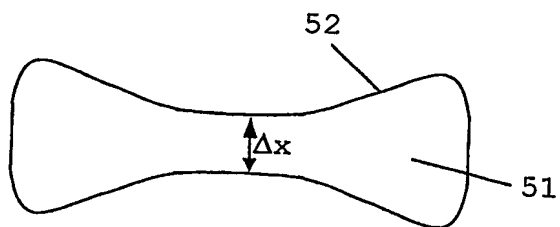
**Figur 1**



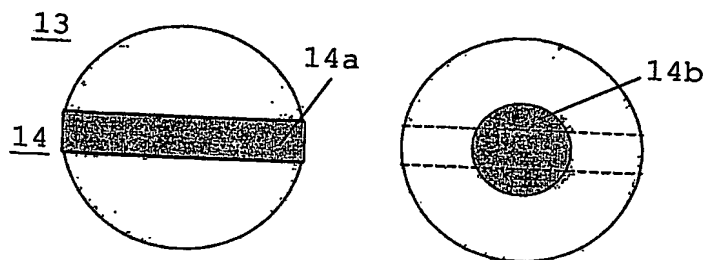
**Figur 2**



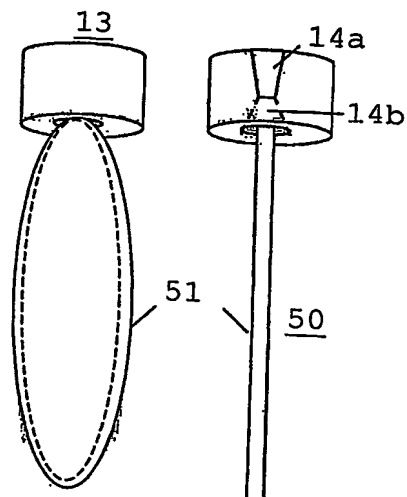
**Figur 3**



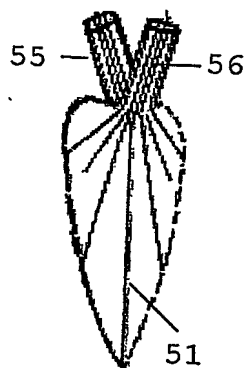
**Figur 4**



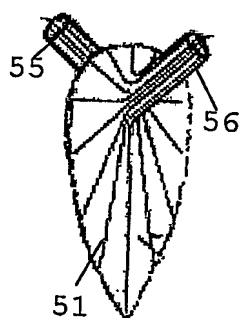
**Figure 5**



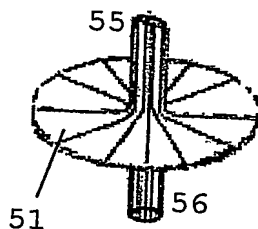
**Figure 6**



**A**

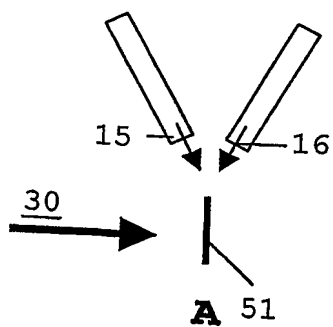


**B**

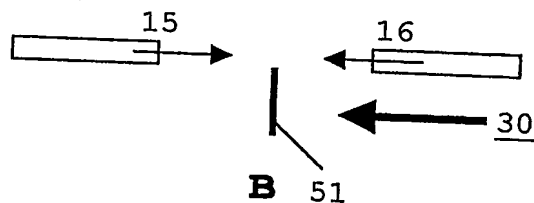


**C**

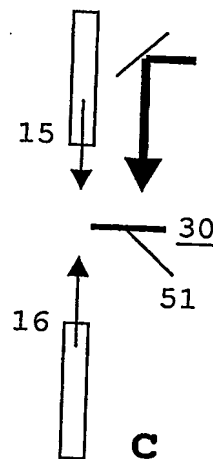
**Figure 7**



**A**

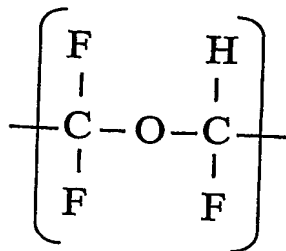


**B**

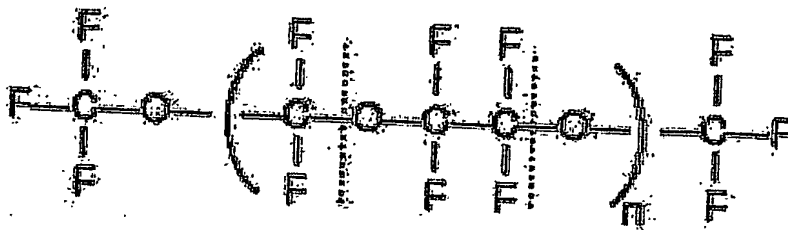


**C**

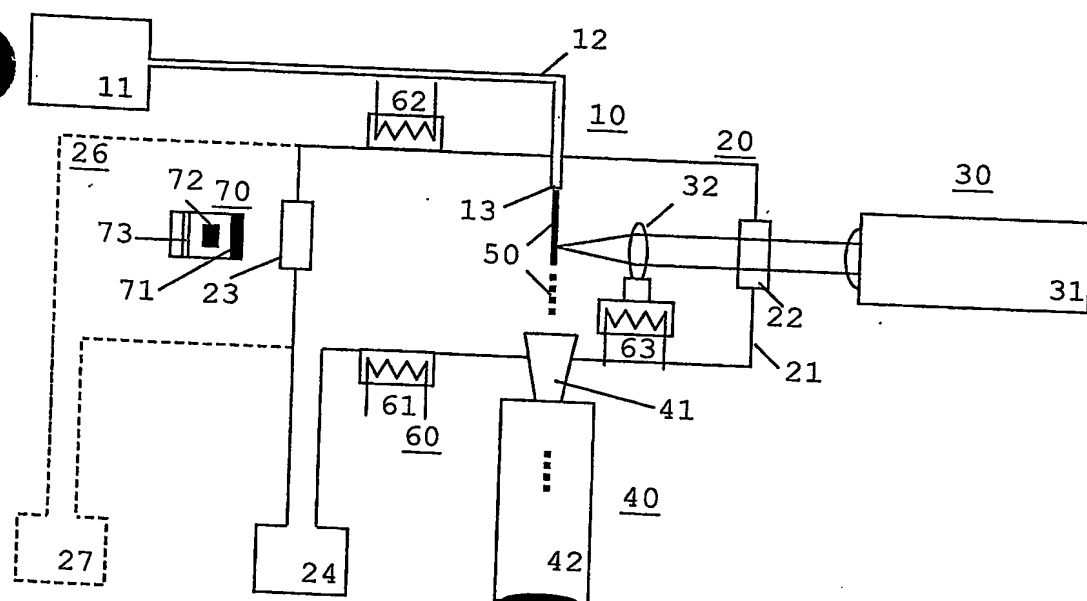
**Figure 8**



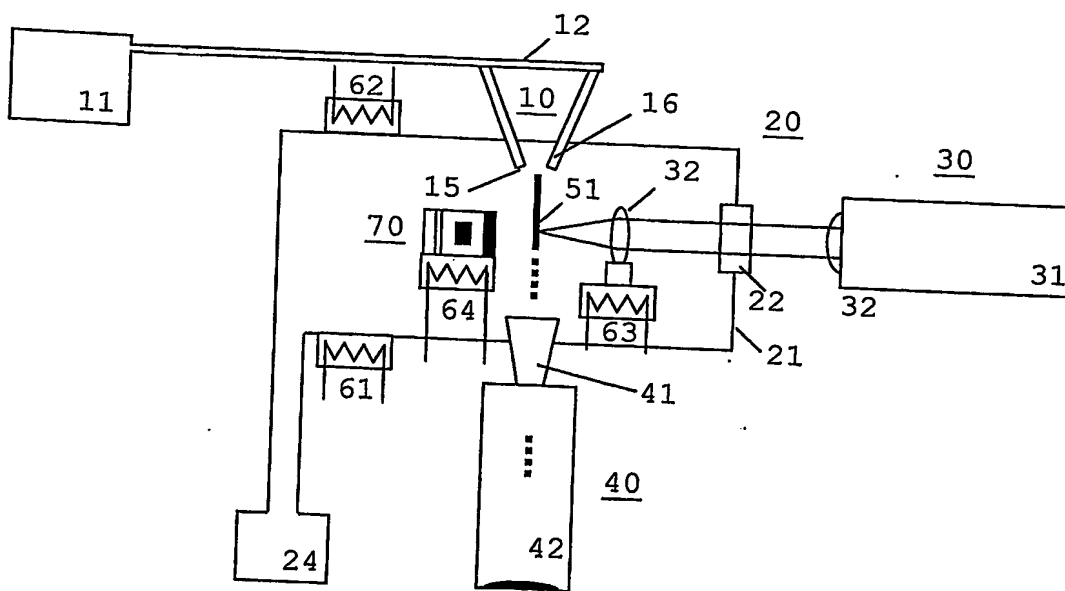
**Figur 9**



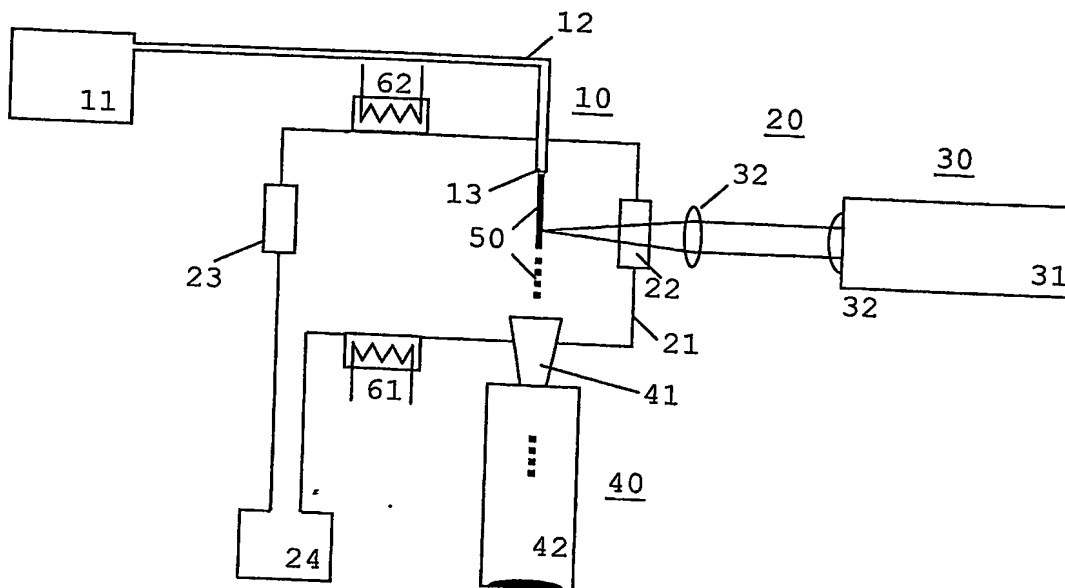
**Figur 10**



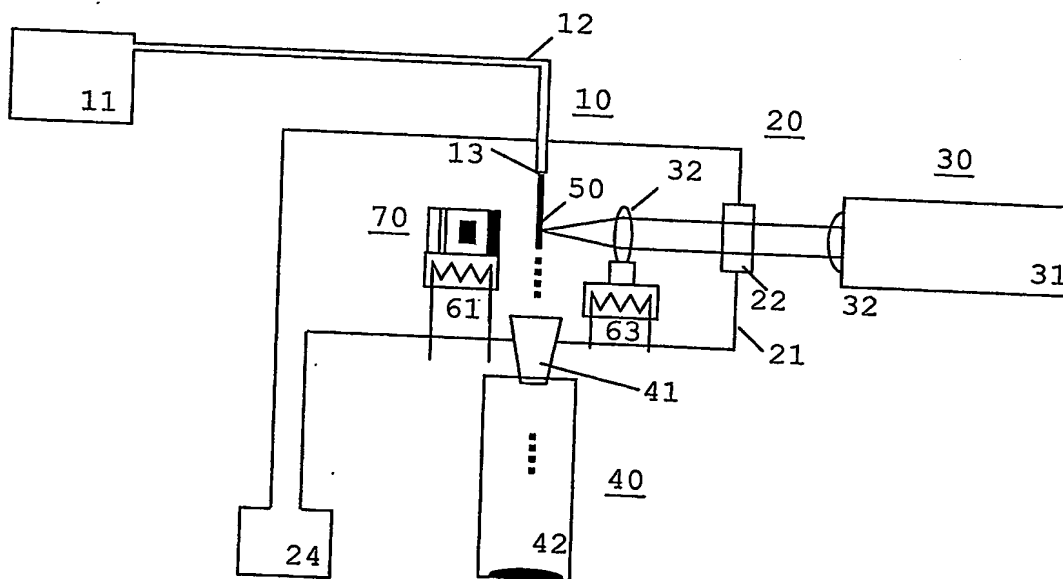
**Figur 11**



**Figur 12**



**Figur 13**



**Figur 14**